

УДК 629.4.027

doi:10.20998/2413-4295.2017.23.10

## РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВАНТАЖНОГО ВАГОНА З МЕТОЮ ОТРИМАННЯ ОЦІНКИ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

**В. О. ШОВКУН**

кафедра вагонів, УкрДУЗТ, Харків, УКРАЇНА  
email: vadim\_shovkun@mail.ru

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто результати моделювання динамічного процесу навантаження буксового вузла використовуючи комплекс «УМ Универсальный механизм». Розроблена в «УМ» імітаційна модель «вагон-залізнична колія» включає в себе кузов напіввагону з можливістю імітувати різну ступінь завантаженості. Отримані реалізації для коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки в діапазоні швидкостей руху від 4+0 до 120 км/год як на прямих, так і в кривих дільницях колії. Доведено, що результати моделювання підпорядковуються нормальному закону розподілення. Визначені основні параметри, що характеризують ці процеси в залежності від швидкості та режиму руху

**Ключові слова:** буксовий вузол; підшипник; піввагон; колісна пара; навантаження; динаміка.

## DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL OF FREIGHT CAR WITH THE AIM OF OBTAINING ESTIMATES OF DYNAMIC PARAMETERS

**V. SHOVKUN**

Department of cars, UkrSURT, Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Considered to improve the reliability of axle equipment is complex and requires an integrated approach for their solution. It is therefore necessary to explore ways of improving existing and creating new designs axle unit. These challenges require an integrated approach which one of the steps is determining the probabilistic loads acting on the elements of the chassis of freight cars. To model the dynamic process of loading axle unit used a series of "UM Universal mechanism", developed in Bryansk state technical University. Developed in "UM" simulation model "car-railway track" includes a body napavine with the capability to simulate varying degrees of workload, trucks of model 18-100 with the ability to change their characteristics, and the model of the elastic way that allows you to change the profile and the macro-geometry of the path. The obtained simulation results obey normal distribution. The main parameters characterizing these processes depending on speed and driving mode. Further using the obtained data, calculated correlation functions of random processes that characterize the combined effect of change of coefficients of horizontal and vertical dynamics of wagon Built correlation functions allows to evaluate the reliability of the axle unit. Modeling of dynamic loads acting on the running parts of freight cars showed sufficient convergence with the results of sea trials of 87%.

**Keywords:** axle box; bearing assemblies; a pair of wheels; load; dynamics.

### Вступ

Залізничний транспорт є головною транспортною артерією України. Він виконує переважну більшість вантажних та пасажирських перевезень в Україні, так і за у міждержавному сполучення.

Безпека перевезень є пріоритетним напрямком діяльності залізниць країн СНД. Її забезпечення залежить від злагодженої роботи всіх структурних підрозділів, але одним з найважливіших чинників є надійна робота вагонів. Відмови елементів конструкції вагонів не лише викликають затримку доставки вантажів споживачам через відчеплення вагонів на шляху прямування, але й призводять до суттєвих додаткових втрат на відновлення працездатності.

Однією з найвідповідальніших елементів конструкції вантажного вагону є буксові вузли з роликівими підшипниками. Як свідчить багаторічний досвід експлуатації парку вантажних вагонів, саме буксові вузли за період 2005-2016 рр. спричинили

2339 випадки відчеплень вагонів на шляху прямування через надмірний нагрів. При цьому щорічно додатково приладами дистанційного контролю колісних пар та оглядачами вагонів по зовнішнім ознакам виявляються до 1000 випадків відмов буксових вузлів, які створювали загрозу безпеці руху.

Основним конструктивним елементом буксового вузла є підшипники. На залізницях країн СНД вже понад 50 років використовуються циліндричні роликіві підшипники. Розрахунки довговічності виконувались за методиками, запропонованим ще у першій половині XX сторіччя. Фактична довговічність циліндричних роликівих підшипників виявилась значно менше розрахункової.

Забезпечення довговічності підшипника, що працює в умовах динамічного радіального і осового навантаження є досить складним завданням. При розрахунку на міцність і надійність елементів конструкції БВ використовуються спрощені схеми, які не враховують ряд діючих чинників. Так, еквівалентне навантаження на підшипники

складається зі статичного та динамічного навантажень. Величина та характер прикладання статичного навантаження вивчені досить повно. Величина динамічного навантаження визначається як додаток до статичного навантаження за допомогою певного пересічного емпіричного коефіцієнту (коефіцієнту вертикальної та горизонтальної динаміки), що враховує нерівності шляху, та динамічні якості візків ходових частин вагону.

### Огляд літератури

Дослідженням з питань підвищення надійності буксових вузлів вагонів присвячено значна кількість робіт [1-4]. З нашої точки зору, принциповою помилкою в розглянутих роботах присвячених підвищенню точності методів розрахунку надійності буксових вузлів вагонів є відсутність аналізу впливу на підшипник осьових сил. Тобто, автори припускаються, що осьові сили взагалі не існують. Але це ствердження не відповідає дійсності. Про це свідчать результати експлуатаційних випробувань буксових вузлів конструкції В. М. Чебаненко [5-7], де підтверджена наявність осьових сил, що завантажують буксові вузли. Про це ж свідчать результати досліджень [8-10]. Те ж саме підтверджують результати динамічних випробувань удосконалених буксових вузлів підвищеної надійності, проведених УкрДАЗТ та ДП УкрНДІВ.

Недосконалість існуючих методів розрахунку призвела до значних похибок при визначенні показників надійності буксових підшипникових вузлів і розбіжності з фактичними результатами експлуатації. Тому оцінку надійності буксових підшипникових вузлів слід виконувати з урахуванням сумісної дії осьових та вертикальних навантажень.

### Мета роботи

Вочевидь, що питання підвищення надійності буксових вузлів є складним і вимагає комплексного підходу для свого розв'язання. Тому необхідно досліджувати різні напрямки удосконалення існуючих та створення нових конструкцій буксового вузла. Однією з задач для підвищення показників надійності є визначення імовірнісних навантажень, що діють на елементи ходових частин вантажних вагонів.

### Виклад основного матеріалу

Для моделювання динамічного процесу навантаження буксового вузла вантажного вагону під час руху з різними швидкостями використовувався комплекс «УМ Универсальный механизм», розроблений Брянським державним технічним університетом. Розроблена за допомогою «УМ» імітаційна модель «вагон-залізнична колія» включає в себе кузов напіввагону з можливістю імітувати різну ступінь завантаженості, візки моделі 18-100 з

можливістю змінювати їх характеристики, а також модель пружної колії, що дозволяє змінювати профіль та макрогеометрію колії.

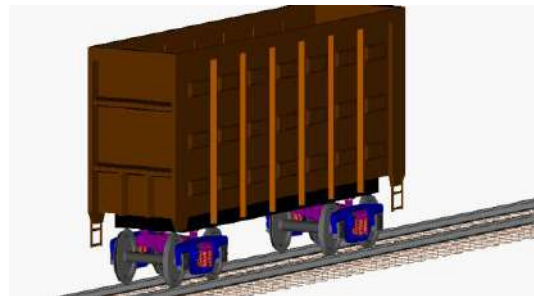


Рис. 1 – Модель «вагон-залізнична колія»

Побудова моделі виконувалась шляхом об'єднання у модель підмодулів, які несуть в собі складові частини моделі: кузов, візки, колісні пари, та пружну колію. Всі елементи моделі пов'язані спеціальними зв'язками та системою координат. Моделювання здійснювалось з використанням "s"-подібного відрізка колії та стрілочним переводом.

Для імітування макрогеометрії та нерівностей колії використовувався файл з бібліотеки програмного комплексу.

При цьому модель дозволяє отримати:

- коефіцієнти динамічних складових вертикальних сил, що діють на буксовий підшипниковий вузол;
- коефіцієнти динамічних складових вертикальних сил, що діють на надресорну балку візка;
- горизонтальні (поперечні рами) сили, які діють від колісної пари на бічні рами візка;

Деякі з отриманих реалізацій, які характеризують зміну коефіцієнту вертикальної та горизонтальної динаміки для набігаючої колісної пари у завантаженому режимі при швидкості руху 100 км/год зображено на рис. 2,3.

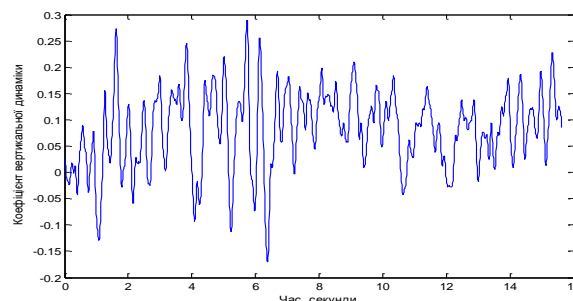


Рис. 2 – Осцилограма зміни коефіцієнту вертикальної динаміки при швидкості 100 км/год на прямій ділянці колії

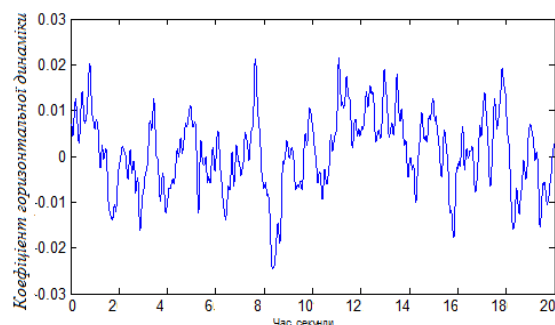


Рис. 3 – Осцилограма зміни коефіцієнту горизонтальної динаміки при швидкості 100 км/год на прямій ділянці колії

Аналогічні реалізації були отримані для коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки в діапазоні швидкостей руху від 40 до 120 км/год як в прямих, так і в кривих ділянках колії. Очевидно, що вони являють собою випадковий процес, отримані результати в межах норм [11].

На наступному етапі роботи проводилась математична обробка отриманих даних методами математичної статистики. При цьому визначались наступні параметри: величина математичного очікування, дисперсія, а також мінімальні та максимальні значення зусиль. Результати досліджень свідчать, що випадкові процеси, які характеризують зміну коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки, розподілені по нормальному закону. Перевірка на відповідність нормальному закону здійснювалась за показниками Калмагорова-Смирнова. Отримані показники відхилення від нормального розподілення  $p = 0,816$ , що є достатнім щоб вважати розподілення Гаусівським.

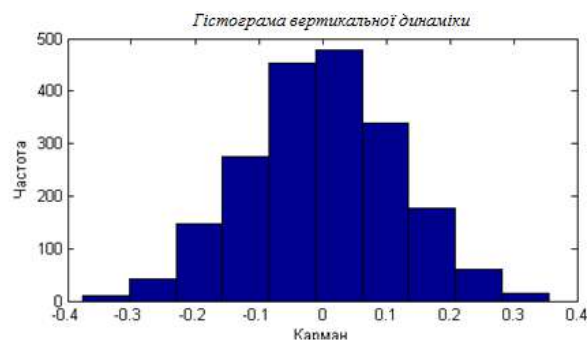


Рис. 4 – Гістограма зміни вертикальної динаміки

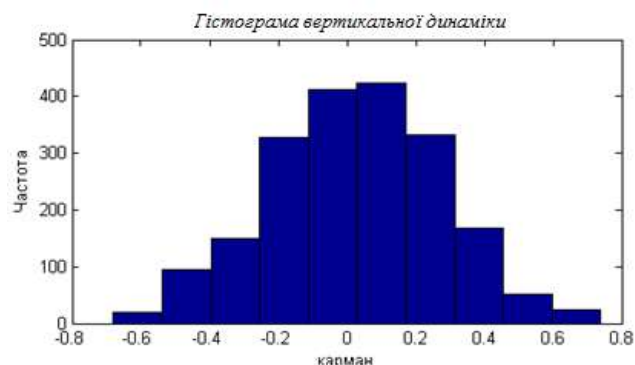


Рис. 5 – Гістограма зміни коефіцієнту горизонтальної динаміки

Для порівняння отриманих даних використовувалися результати ходових динамічних випробувань напіввагону моделі 12-7023, які проведені фахівцями ДП УкрНДІВ. Залежності, що характеризують зміну математичного очікування випадкового процесу вертикальних та горизонтальних навантажень від швидкості руху, наведено на рис. 6, 7. На рисунку представлені порівняння експериментальних даних та результати моделювання. Збіжність експериментальних та теоретичних даних склало близько 87%, що є цілком задовільним.

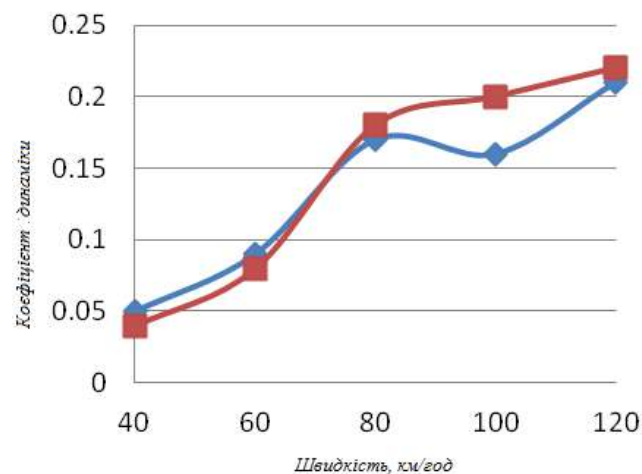


Рис. 6 – Зміна математичного очікування випадкового процесу коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки від швидкості руху

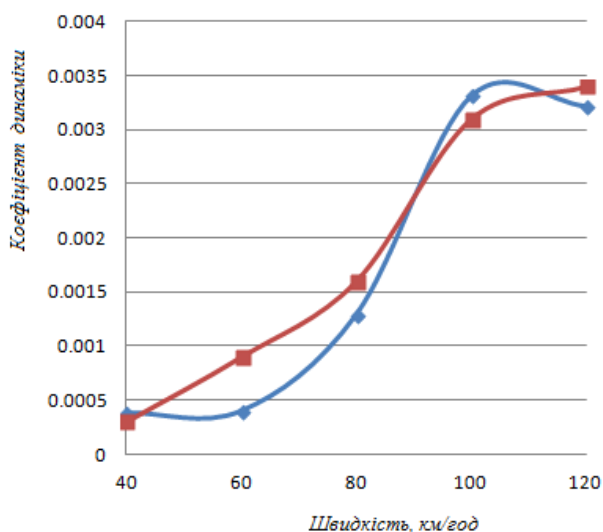


Рис. 7 – Зміна дисперсії о випадкового процесу коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки від швидкості руху

Очевидно, що ці отримані залежності являють собою випадковий процес із синусоїдальною складовою, параметрам якого властиве значне розсіювання. Тому для його дослідження необхідно застосовувати методи теорії імовірності і теорії випадкових функцій. Процес навантаження буксових вузлів являє собою випадковий процес.

Для стаціонарних випадкових процесів визначальними є математичне очікування та дисперсія процесу. При цьому основні статистичні характеристики суми двох випадкових процесів зміни вертикальних та горизонтальних навантажень  $x_1$  і  $x_2$  відповідно будуть рівні [12]:

$$\bar{y} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2; \quad (1)$$

де  $\bar{y}, \bar{x}_1, \bar{x}_2$  – математичне очікування відповідно сумарного, вертикального та горизонтального випадкових процесів.

$$D_y = D_{x_1} + D_{x_2} + 2r\sqrt{D_{x_1}D_{x_2}}; \quad (2)$$

де  $D_y, D_{x_1}, D_{x_2}$  дисперсії відповідно сумарного, а також випадкових процесів вертикального та горизонтального динамічного навантаження;  $r$  – коефіцієнт кореляції процесів  $x_1$  і  $x_2$ ;

Однією з найважливіших характеристик випадкових процесів зміни динамічних навантажень є кореляційна функція.

$$R_{(y)} = R_{x_1} + R_{x_2} + 2R_{x_1x_2}; \quad (3)$$

де  $R_y, R_{x_1}, R_{x_2}$  – кореляційні функції відповідно сумарного, вертикального та горизонтального випадкових процесів;  $R_{x_1x_2}$  – взаємна кореляційна функція процесів  $x_1$  і  $x_2$ .

В подальшому використовуючи отримані дані, обчислені кореляційні функції для випадкових процесів, що характеризують сумісну дію зміни коефіцієнтів вертикальної та горизонтальної динаміки вагону.

За результатами досліджень для кожного з отриманих випадкових процесів були побудовані кореляційні функції.

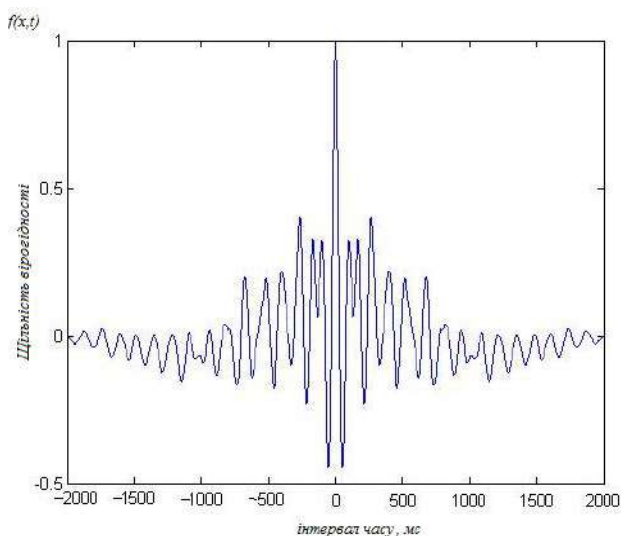


Рис. 8 – Кореляційна функція для руху зі швидкістю 100 км/год (в кривій)

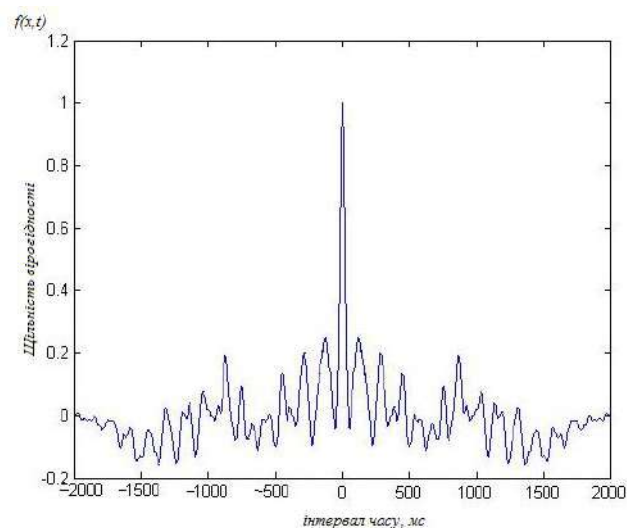


Рис. 9 – Кореляційна функція для руху зі швидкістю 100 км/год (в прямій)

Побудовані кореляційні функції дозволяють виконати оцінку надійності буксового вузла.

**Висновок**

Моделювання динамічних навантажень діючих на ходові частини вантажних вагонів показало достатню збіжність з результатами ходових випробувань, близько 87%. Тому запропонована модель може бути використана для оцінки збурюючих навантажень при розрахунках надійності буксових вузлів вантажних вагонів. Доведено, що цей процес має стаціонарний та ергодичний характер.

Отримані результати моделювання підпорядковуються нормальному закону розподілення. Визначені основні параметри, що характеризують ці процеси в залежності від швидкості та режиму руху

**Список літератури**

1. Lunys, O. Reiedmenu asideziu šilumokacijos procesal vaziuojant gelezinkelio kreivemis / O. Lunys, G. Bureika // *Mokslas – Lietuvos ateitis*. – 2013. – № 5. – P. 552-557. – doi: 10.3846/mla.2013.87.
2. Lunys, O. Investigation on features and tendencies of axle-box heating / O. Lunys, S. Dailydka, G. Bureika // *Transport Problems*. – 2015. – № 1. – P. 105-114.
3. Lunys, O. Riedmenų ašidėžių kaitimo temperatūrų kitimo tendencijos / O. Lunys, R. Subačius // *Mokslas – Lietuvos Ateitis. Transportas*. – 2012. – № 4. – P. 361-365. – doi: 10.3846/2000-M.
4. Лукин, В. В. Конструирование и расчет вагонов: учебник для вузов ж.-д. трансп. / В. В. Лукин, Л. А. Шадур, В. Н. Котуранов, А. А. Хохлов, П. С. Анисимов. – М.: УМК МПС России, 2000. – 731 с.
5. Мартынов, И. Э. Анализ опыта эксплуатации цилиндрических роликотподшипников букс грузовых вагонов / И. Э. Мартынов // *Вісник Східноукраїнського державного університету*. – 2000. – № 5 (27). – С. 157-159.
6. Цюренко, В. Н. Опыт эксплуатации вагонов с буксовыми узлами на подшипниках качения / В. Н. Цюренко // *Пути совершенствования конструкций буксовых узлов вагонов с подшипниками качения: труды ВНИИЖТ*. – М.: Транспорт, 1982. – Вып. 654. – С. 4-26.
7. Цюренко, В. Н. Особенности работы крупногабаритных цилиндрических роликотподшипников под действием осевых сил / В. Н. Цюренко, И. Г. Цуркан, А. Н. Мирза // *Вестник машиностроения*. – 1974. – № 11. – С. 52-55.
8. Донченко, А. В. Результати динамічних випробувань вагонів з дослідними роликотподшипниками / А. В. Донченко [та ін.] // *Зб. наук. праць Київського університету економіки і технологій транспорту. Серія "Транспортні системи і технології"*. – 2003. – Вип. 4. – С. 106-110.
9. Мартинов, І. Е. Результати експлуатаційних випробувань здвоєних касетних циліндричних підшипників в буксах вантажних вагонів / І. Е. Мартинов, А. В. Труфанова, Є. Р. Можейко, В. М. Ільчишин, В. О. Шовкун // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2015. – № 7 (73). Doi:10.15587/1729-4061.2015.36080.

10. Донченко, А. В. Дослідження динамічних навантажень, що діють на буксові вузли вантажних вагонів / А. В. Донченко [та ін.] // *Збірник наукових праць*. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 119. – С. 106-110.
11. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983. – 258 с.
12. Болотин, В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1971. – 256 с.

**Bibliography (transliterated)**

1. Lunys, O., Bureika, G. Reiedmenu asideziu šilumokacijos procesal vaziuojant gelezinkelio kreivemis, *Mokslas – Lietuvos ateitis*, 2013, 5, P. 552-557, doi: 10.3846/mla.2013.87.
2. Lunys, O., Dailydka, S., Bureika, G. Investigation on features and tendencies of axle-box heating, *Transport Problems*, 2015, 1, 105-114.
3. Lunys, O., Subačius, R. Riedmenų ašidėžių kaitimo temperatūrų kitimo tendencijos, *Mokslas – Lietuvos Ateitis. Transportas*, 2012, 4, 361-365, doi: 10.3846/2000-M.
4. Lukin, V. V., Shadur, L. A., Koturanov, V. N., Hohlov, A. A., Anisimov, P. S. Konstruirovanie i raschet vagonov: uchebnik dlya vuzov zh.-d. transp., M.: UMC MPS Rossii, 2000, 731 s.
5. Martynov, I. E. Analiz opyta ehkspluatacii cilindricheskikh rolikopodshipnikov buks gruzovykh vagonov, *Visnik Shkhdnoukrains'kogo derzhavnogo universitetu*, 2000, 5 (27), 157-159.
6. Cyurenko, V. N. Opyt ehkspluatacii vagonov s buksovimi uzlamy na podshipnikah kacheniya, *Puti sovershenstvovaniya konstrukcij buksovykh uzlov vagonov s podshipnikami kacheniya: trudy VNIIZHT*, M.: Transport, 1982, Vyp. 654, 4-26.
7. Cyurenko, V. N., Curkan, I. G., Mirza, A. N. Osobennosti raboty krupnogabaritnykh cilindricheskikh rolikopodshipnikov pod deystviem osevykh sil, *Vestnik mashinostroeniya*, 1974, 11, 52-55.
8. Donchenko, A. V. [ta in.] Rezul'tati dinamichnih viprobuvan' vagoniv z doslidnimi, *Zb. nauk. prac' Kiivs'kogo universitetu ekonomiki i tekhnologij transportu. Seriya "Transportni sistemi i tekhnologii"*, 2003, 4, 106-110.
9. Martinov, I. E., Trufanova, A. V., Mozhejko, Ye. R., Il'chishin, V. M., Shovkun, V. O. Rezul'tati ehkspluataciynih viprobuvan' zdvoenih kasethih cilindrichnih pidshipnikiv v buksah vantazhnykh vagoniv, *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij*, 2015, 7 (73), doi:10.15587/1729-4061.2015.36080.
10. Donchenko, A. V. [ta in.] Doslidzhennya dinamichnih navantazhen', shcho diyut' na buksovi vuzli vantazhnykh vagoniv, *Zbirknik naukovih prac'*. – Harkiv: UkrDAZT, 2010, 119, 106-110.
11. Normy dlya rascheta i proektirovaniya novykh i moderniziruemykh vagonov zheleznykh dorog MPS kolei 1520 mm (nesamohodnykh). – M.: VNIIV-VNIIZHT, 1983. – 258 s.
12. Bolotin, V. V. Primenenie metodov teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij, M.: Strojizdat, 1971, 256 s.

### Відомості про авторів (About authors)

**Шовкун Вадим Олександрович** – аспірант, асистент кафедри вагонів, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, Україна; e-mail: vadim\_shovkun@mail.ru.

**Vadim Shovkun** – department wagons, The Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vadim\_shovkun@mail.ru.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Шовкун, В. О.** Розробка імітаційної моделі вантажного вагона з метою отримання оцінки динамічних показників / **В. О. Шовкун** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 23 (1245). – С. 62-67. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.10.

*Please cite this article as:*

**Shovkun, V.** Development of simulation model of freight car with the aim of obtaining estimates of dynamic parameters. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **23** (1245), 62–67, doi:10.20998/2413-4295.2017.23.10.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Шовкун, В. А.** Разработка имитационной модели грузового вагона с целью получения оценки динамических показателей / **В. А. Шовкун** // Вестник НТУ «ХПІ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ» – 2017. – № 23 (1245). – С. 62-67. – doi:10.20998/2413-4295.2017.23.10.

**АННОТАЦИЯ** Рассмотрены результаты моделирования динамического процесса нагружения буксового узла используя комплекс «Универсальный механизм УМ». Разработанная в «УМ» имитационная модель «вагон-железнодорожная колея» включает в себя кузов полувагона с возможностью имитировать различную степень загрузки. Полученные для реализации коэффициентов вертикальной и горизонтальной динамики в диапазоне скоростей движения от 4+0 до 120 км/год как на прямых, так и в кривых участках пути. Доказано, что результаты моделирования подчиняются нормальному закону распределения. Определены основные параметры, характеризующие эти процессы в зависимости от скорости и режима движения.

**Ключевые слова:** буксовый узел; подшипник; полувагон; колесная пара; нагрузка; динамика.

*Надійшла (received) 31.05.2017*